第46卷 第12期
2023年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 12
Dec. 2023

附面层位移厚度对沙障防风效益评价的适用性研究
——以聚乳酸(PLA)沙障为例

张 帅[1]， 原伟杰[1]， 刘 卉[2]， 王海霞[1]， 官昊慧[1]， 王鹿振[3]

(1. 中国林业科学研究院华北林业实验中心/北京九龙山暖温带国家森林长期科研基地,北京 102300；
2. 沃德兰特(北京)生态环境技术研究院有限公司,北京 100080；3. 青海省水利水电勘测
规划设计研究院有限公司,青海 西宁 810000)

摘 要: 地表粗糙度作为风蚀防护中常用的传统指标,在防护林、沙障等工程措施的防护效益评价中发挥了重要作用。但在实际应用中发现,地表粗糙度存在不完全准确的现象。针对这一问题,引入新的参考指标附面层位移厚度,借助风洞模拟实验的方法,通过测定不同边长聚乳酸沙袋沙障中的风速频数、拟合风速流场、计算防风效能等来验证地表粗糙度和附面层位移厚度这2个指标的准确性。结果表明:随着聚乳酸沙袋沙障障格边长的增大,平均风速呈现出上升的趋势,其中障格边长为1.5 m和2.0 m沙障内的平均风速分别是1.0 m沙障的1.13和1.24倍;防风效能则呈现出下降的趋势,其中障格边长为1.0 m沙障内各处均大于0.6,1.5 m沙障内各处均大于0.5,2.0 m沙障内各处均大于0.4;风速流场高速区的面积呈现出增大的趋势。这表明随着沙障障格边长的增大,沙障的防护作用逐渐下降。与此同时,随着沙障障格边长的增大,附面层位移厚度呈现出减小的趋势,而地表粗糙度则呈现出先减小后增大的趋势。综上,附面层位移厚度在评价沙障防护作用时的准确性更高,可作为新的补充参考指标。

关 键 词: 附面层位移厚度；风蚀评价；风洞模拟；聚乳酸沙障

文章编号: 1000－6060(2023)12－1973－11(1973～1983)

风力侵蚀是指在气流冲击作用下土粒、沙粒脱离地表,被搬运和堆积的过程[1]。风蚀造成了严重的自然灾害和环境问题,尤其是在干旱半干旱地区,往往成为制约农业生产和导致环境恶化的主导因素,影响了这些地区的资源开发和社会经济的持续发展[2-3]。为有效降低风沙灾害,研究人员开展了多种风蚀防护措施的研究,如防护林、生物结皮、固沙剂及沙障等[4-7]。其中,沙障因其布设简便、防护效果好及防护时间长等优点,是我国防沙治沙工作中的重要工程措施[8-9]。在风蚀防护措施的防护效益评价中,地表粗糙度因其对下垫面改变的敏感度最高,得到了广泛的应用[10-11]。

由于地表起伏以及粗糙不光滑的性质,气流流经地表时受摩擦力的影响,导致近地表处风速降低,在垂直高度上呈现出不同分布规律,这种风速随高度分布的曲线称为风速廓线[12]。在风速廓线上风速为零的位置并不出现在高度为零的地表,而是高出一定距离,这一高度被称为地表粗糙度,又称空气动力学地表粗糙度[13]。近代流体力学奠基人普朗特指出粗糙度概念的本质表明了气体具有粘性,并给出了粗糙地面的关系式,后经尼古拉斯的实验测定,得出普适速度分布公式[14]:

$$u = V_*\left(5.75\lg\frac{hV_*}{v} + 5.5\right) \tag{1}$$

收稿日期: 2023-04-28； **修订日期:** 2023-07-11
基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(32001375);国家林业和草原局科技创新青年拔尖人才项目(2019132604);林业科学技术推广项目([2019]34)资助
作者简介: 张帅(1991-),男,博士,助理研究员,主要从事荒漠化防治研究. E-mail: zs@caf.ac.cn
通讯作者: 原伟杰(1986-),女,博士,副研究员,主要从事退化土地修复工作. E-mail: yuanwj@caf.ac.cn

式中：u为速度(m·s^{-1})；V_*为摩阻流速(m·s^{-1})；h为高度(m)；v为运动粘性系数(m^2·s^{-1})。

随后风沙物理学奠基人拜格诺将上述理论引入到风沙运动中，并提出了固定地表的风速廓线公式[15]：

$$u_h = 5.75V_* \lg\frac{h}{Z_0} \tag{2}$$

式中：u_h为高度h处的风速(m·s^{-1})；Z_0为粗糙度(m)。

进一步的，可以推导出粗糙度的计算公式：

$$\lg Z_0 = \frac{\lg Z_2 - \frac{v_2}{v_1}\lg Z_1}{1 - \frac{v_2}{v_1}} \tag{3}$$

式中：Z_1、Z_2为2个不同的高度(m)；v_1、v_2分别为高度Z_1和Z_2处的风速(m·s^{-1})。

地表粗糙度反映了粗糙地表对气流的阻滞作用，表明地表不同下垫面与近地表气流的相互作用和物质能量交换，在风蚀防护评价中得到了广泛的应用[16-18]。但在近几十年的国内外研究中，科研人员大多只是采纳这一参数，并没有进行更深入的研究，甚至有学者提出现有的计算方式只是对粗糙度的估算，计算结果并不准确[19]。通过分析粗糙度的计算公式，本研究发现，粗糙度由2个不同高度的风速计算获得，而不同的高度组合会得到不同的数值，因此粗糙度数值具有不唯一性，进而只适用于当次实验，无法用于多实验间的对比分析。地表粗糙度在特定下垫面条件下并不是一个常数，而是随着风速的变化产生明显的变化，野外气流变化较为复杂，仅用2个高度的数据进行计算所得到的误差也较大。

通过对风速廓线的研究，本研究提出利用附面层位移厚度来进行评价防护效益。附面层是指由于气流具有粘性而不可忽略的地表流动层[20]，附面层位移厚度是指相比于光滑通道，相同体积的粘性流体在相同时间内流过的通道所需加宽的厚度[21-22]，代表了粗糙地表对气流能量的消耗。将风速廓线进行积分，计算函数曲线与坐标轴间的面积，与其面积相等的矩形的长度即为附面层位移厚度(图1)，进一步可推导出附面层位移厚度的计算公式[11]：

$$\Delta d = \frac{\int_0^{a_0} f(x)\mathrm{d}x}{a_0} \tag{4}$$

式中：Δd为附面层位移厚度；$f(x)$为风速廓线函数；a_0为理想状态下的风速值(m·s^{-1})。

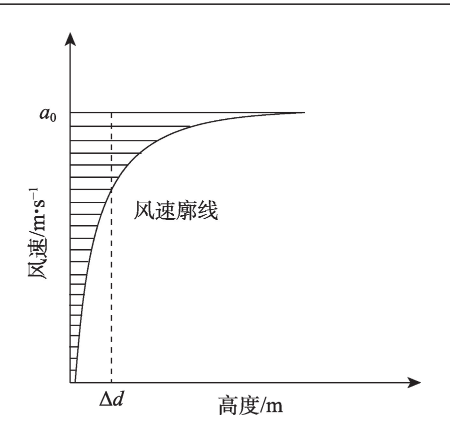


图1 附面层位移厚度示意图

Fig. 1 Diagram of displacement thickness of boundary layer

聚乳酸沙袋沙障是近年来应用较多的新材料沙障，具有绿色可降解、防护时间长、成本低、布设简单等优点，且实现了以沙治沙的理念，在风沙治理中发挥着重要的作用[23-24]。因此，本研究以聚乳酸沙袋沙障(图2)为研究对象来分析地表粗糙度和附面层位移厚度在评价防护措施防护效果时的准确性，通过风洞模拟实验，分别计算地表粗糙度和附面层位移厚度，并以风速频数、风速流场及防风效能等指标为依据来衡量这2个参数的准确性和适用性。

1 材料与方法

1.1 风洞

本研究中应用的风洞模拟实验系统属于直流式风洞(图3a)。风洞全长约为24.3 m，其中实验段长度为12 m，实验段的横截面积为0.6 m×0.6 m；动力段长度为1.48 m，为实验提供气流；稳定段长度为1.5 m，内置蜂窝网，将大团空气打散，转变为细流；收缩段长度为1.5 m，通过横截面积的急剧收缩加速气流速度，三者可提供风速在3~40 m·s^{-1}范围内连续可调的稳定气流。在实验中，我们利用粗糙元(4 cm×5 cm×6 cm，图3b)来拟合风速廓线，布设方式如图3c所示，并通过以下公式计算雷诺数(Re)[20]：

$$\mathrm{Re} = \frac{u \times d}{v} \tag{5}$$

式中：u为流速(m·s^{-1})；d为特征长度(m)；v为空气粘度(m^2·s^{-1})，取值1.5×10^{-5} m^2·s^{-1}。参考野外气象资料，本研究设置实验风速为8 m·s^{-1}(高度1 m处)，此时雷诺数为3.2×10^5。

为准确测量不同位置的风速，我们采用了三维



图2 聚乳酸沙袋沙障

Fig. 2 Polylactic acid sandbag barrier

移测系统，可在实验段自由移动，精度为1 mm。测量设备我们采用了热膜风速仪（IFA300，TSI，Shoreview，MN，USA）和热线风速仪（VT-200，KIMO，Montpon Ménestérol，France）。

1.2 模型制作

聚乳酸沙袋沙障常用障体高度为10 cm，障格边长为1.0 m、1.5 m和2.0 m。本研究采用聚乳酸材料灌装沙土的方式按照1:5的比例制作模型，模型高度为2 cm，相应障格边长分别为20 cm、30 cm和40 cm，铺成10行3列网格，此外为接近野外地表实际状况，在实验段底板上粘附一层沙粒。

风洞实验测点布设如图4所示。沿风向在洞体中间网格的中线布设测点，初始位置位于障前20 cm，水平方向测点间隔为障格的十等分距，垂直高度测点间隔为1 cm，垂直高度测量范围为1~20 cm。沿风向测定不同障格内风速，直至网格内风速值趋于稳定，并在下一个网格内布设水平截面测点。水平截面测点每行、列分别布设9个测点，布设高度分别为1 cm（低于障高）、2 cm（与障高平齐）和4 cm（高于障高）。

1.3 风速频数统计

统计风速稳定后障格内不同高度的风速频数，分析最小值、最大值、平均值、标准差、峰度、偏度及变异系数等指标。峰度是表征与正态分布曲线相比，概率密度分布曲线分布的陡峭程度，正值表示平均值处分布更多的数值，负值表示数值分布较为集中，计算公式为[25]：

$$K = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\right)^2} \tag{6}$$

式中：K为峰度；x_i为第i个统计数值；$\bar{x}$为样本平均值；n为样本数量。

偏度是指相对于正态分布曲线，概率密度分布曲线分布的对称情况。偏度为正值表明数据更多的分布在左侧，样本中位数小于均值；偏度为负值表明数据更多的分布在右侧，样本中位数大于均值。计算公式为[26]：

$$S = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\right)^{\frac{3}{2}}} \tag{7}$$

式中：S为偏度；x_i为第i个统计数值；$\bar{x}$为样本平均值；n为样本数量。

样本峰度和偏度可以分析样本频数分布特征，变异系数则可以分析样本的离散程度。一般认为，数值大于0.15时样本数据变异程度较大，数据可靠性较差。计算公式为[27]：

$$C_v = \frac{\mathrm{sd}}{\mathrm{mean}} \tag{8}$$

式中：C_v为变异系数；sd为标准差；mean为样本均值。

1.4 空间相关性

空间自相关统计量是用于度量空间数据的一个基本性质，即某位置上的数据与其他位置上的数

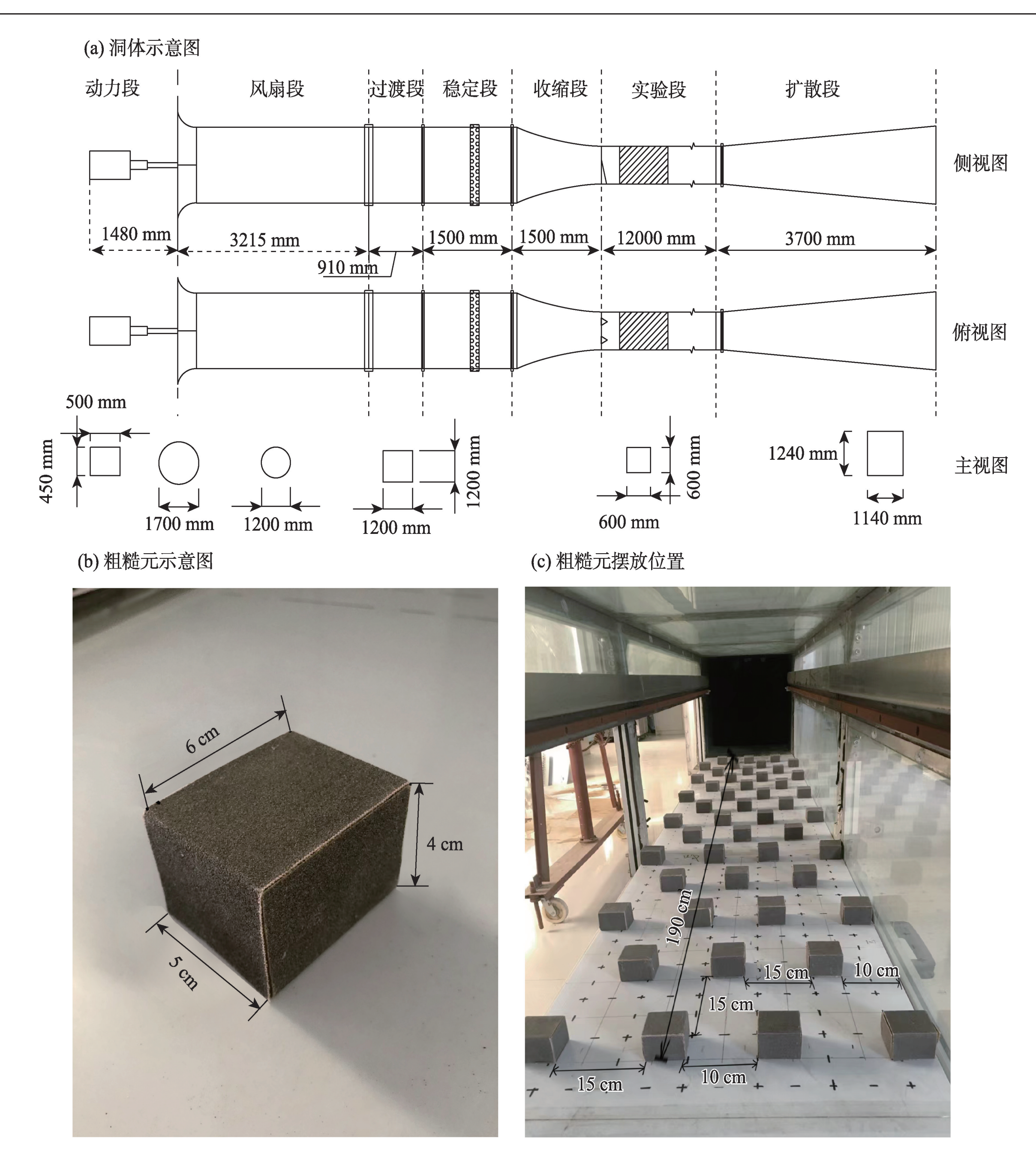


图3 风洞示意图

Fig. 3 Wind tunnel schematic diagram

据间的相互依赖程度,模型包括块金值、基台值、变程等参数。其中,变程指相邻2个位置具有空间相关性的最大距离,块金值与基台值的比值即为空间相关度,一般认为区域中的测点间空间相关度在0~0.25范围内具有极强的相关性,在0.25~0.75范围内具有中等程度的相关性,大于0.75时空间相关性较弱[28]。

1.5 防风效能

防风效能是指气流经过防护措施后风速下降的程度。计算公式为[29]:

$$a = \frac{v_0 - v_1}{v_0} \tag{9}$$

式中:a为防风效能;v_0为原风速(m·s^{-1});v_1为气流经过防护措施后的风速(m·s^{-1})。

2 结果与分析

2.1 地表粗糙度与附面层位移厚度

通过测量风速达到稳定后的障格内不同高度处的风速值,拟合出不同边长沙障的风速廓线

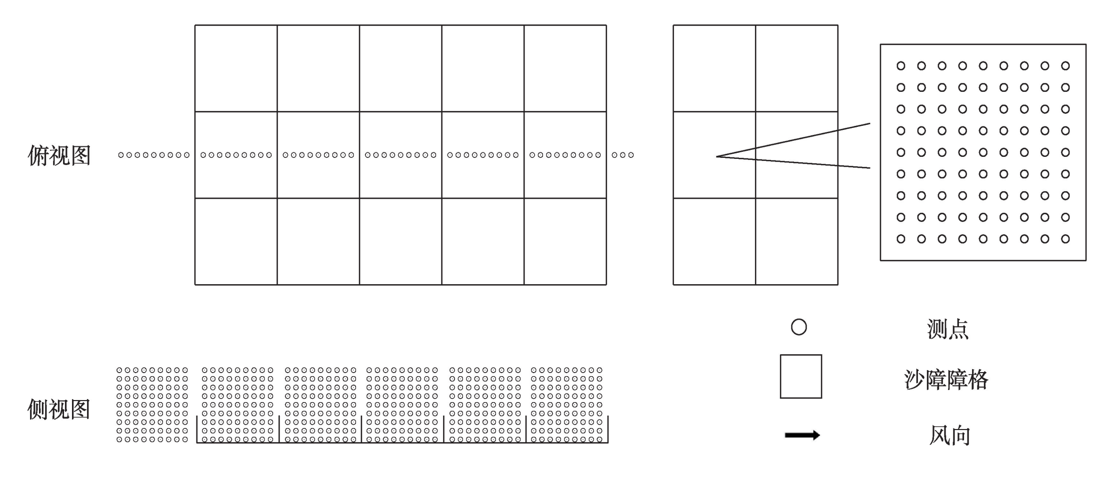


图4　实验测点分布

Fig. 4　Distribution of experimental measurement points

(图5),各风速廓线均能较好地拟合为以自然指数为底的指数函数,且决定系数(R^2)均大于0.97。

根据风速廓线可以计算出不同边长的障格内风速稳定后的粗糙度和附面层位移厚度(表1),其中在地表粗糙度的计算中选取了实际高度为15 cm和100 cm处的风速值。从表1可见,地表粗糙度随着障格边长的增加呈现出先减小后增大的趋势,边长为1.0 m沙障网格的地表粗糙度数值最高,分别为1.5 m和2.0 m的2.98和1.80倍。与地表粗糙度不同的是,附面层位移厚度呈现出随着障格边长的增大而减小的规律。

2.2　风速频数统计

统计分析不同边长沙障风速稳定后的障格内风速频数(表2)可见,不同高度的风速频数均值随着障格边长的增大均呈现出上升的趋势。边长为1.5 m和2.0 m的沙障障格内风速频数均值在低于障格高度处分别是1.0 m障格的1.28和1.69倍,在障格高度处分别是1.0 m障格的1.14和1.20倍,在高于障格高度处分别是1.0 m障格的1.06和1.11倍,整体平均分别是1.0 m障格的1.13和1.24倍。从增长的幅度可以看出,随着高度的增加,风速趋向于稳定。但是数据标准差较大,表明均值受极值的影响较大。且从数据分布的峰度、偏度可以看出,风速频数离散程度较大,表明障格内的风速变化较为剧烈且复杂。此外,近半数样本的变异系数达到0.15以上,这表明风速均值受极值影响较大,需要更进一步的处理和分析。

2.3　空间自相关性

为了进一步研究沙障防护效果和障格边长之间的关系,需要拟合障格内的风速流场。在拟合之前,为分析障格内测点之间是否具有空间相关性,利用地统计学的方法对不同边长的障格风速频数进行空间自相关分析(表3)。结果表明,不同边长的沙障网格内的风速频数均能拟合为高斯模型,且空间相关度均小于0.25,表明障内测点间具有极强的空间相关性,风洞模拟实验数据具有较高的可靠

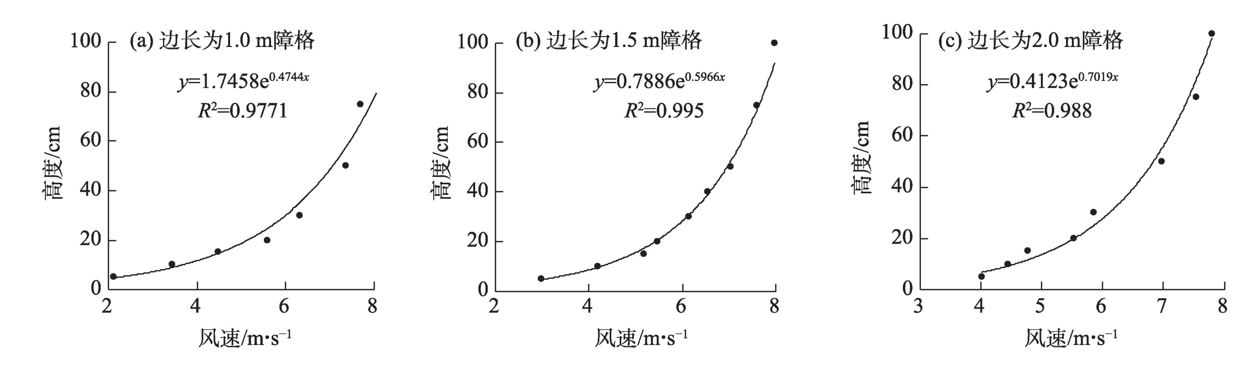


图5　风速稳定后沙障网格内风速廓线

Fig. 5　Wind speed profile within the sand barrier grid after stable wind speed

表1 不同障格边长的沙障地表粗糙度和附面层位移厚度

Tab. 1 Surface roughness and boundary layer displacement thickness of sand barriers with different side lengths

参数	障格边长		
	1.0 m	1.5 m	2.0 m
地表粗糙度/m	0.0137	0.0046	0.0076
附面层位移厚度	20.00	19.38	18.09

性和准确性。

2.4 风速流场

数值模拟不同障格内风速稳定后流场如图6所示。不同边长障格内风速均小于原风速，表明沙障起到了良好的防护作用。测量高度为5 cm处的风速流场可以看到，边长为1.0 m的障格在障后左右形成2个蓝色减速区，中间形成黄色加速区，核心有部分橙色区域；边长为1.5 m障格后形成较大范围的蓝色低速区，随后风速逐渐恢复，并在障格后半部分形成2个橙色涡流加速区域，；边长为2.0 m障格在障后1/3范围内形成2个蓝色低速区，中后部则是大范围的橙色加速区。测量高度为10 cm的风速流场可以看到，边长为1.0 m障格后风速逐渐降低，两侧速度降低更快；边长为1.5 m障格内形成中部低速，向两侧增大的结构；2.0 m障格内流场结构与测量高度5 cm时相似，但颜色变浅。测量高度为20 cm处不同边长障格均呈现出障后风速下降的趋势，且障格边长越大，风速越大。

2.5 防风效能

通过分析风速稳定后不同边长沙障障格内的防风效能(图7)可见，不同边长障格内的防风效能均大于0.4，且随着边长的增大，防风效能呈现出下降的趋势。边长为1.0 m障格内的防风效能均大于0.6，边长为1.5 m障格内的防风效能均大于0.5，边长为2.0 m障格内防风效能均大于0.4。边长为1.0 m和1.5 m的障格内防风效能下降较为均匀，边长为2.0 m的障格内防风效能在0.4~0.6范围内急剧下

表2 不同边长沙障障格内风速频数分布

Tab. 2 Frequency distribution of wind speed within different side length barriers

障格边长/m	高度/cm	最小值/m·s^{-1}	最大值/m·s^{-1}	均值±标准差/m·s^{-1}	峰度	偏度	变异系数
1.0	5	0.69	3.02	1.86±0.62	−1.07	−0.12	0.33
	10	2.55	4.93	3.62±0.55	−0.42	0.17	0.15
	20	4.01	6.75	4.89±0.42	3.45	0.96	0.09
1.5	5	0.46	3.99	2.39±1.05	−1.25	−0.31	0.44
	10	3.05	5.60	4.13±0.52	0.02	0.24	0.13
	20	4.36	5.98	5.20±0.42	0.12	0.37	0.07
2.0	5	0.70	4.55	3.15±1.05	−0.21	−0.98	0.33
	10	2.97	4.93	4.33±0.41	0.56	−0.72	0.10
	20	4.53	6.88	5.42±0.35	−0.68	0.15	0.08

表3 不同边长的沙障障格空间自相关分析

Tab. 3 Autocorrelation analysis of barrier grid space with different side lengths

障格边长/m	模型	块金值	基台值	变程	空间相关度	决定系数(R^2)	残差平方和(RSS)/10^{-4}
1.0	Gaussion	0.045	0.505	6.85	0.09	0.998	0.751
	Gaussion	0.064	0.371	7.43	0.17	0.998	0.603
	Gaussion	0.056	0.285	11.22	0.20	0.993	0.695
1.5	Gaussion	0.048	1.071	8.80	0.04	0.999	1.181
	Gaussion	0.035	0.369	7.47	0.09	0.998	1.115
	Gaussion	0.001	0.130	3.37	0.01	0.782	7.427
2.0	Gaussion	0.047	0.436	4.55	0.01	0.958	7.330
	Gaussion	0.036	0.374	5.67	0.10	0.997	4.395
	Gaussion	0.057	0.673	7.23	0.08	0.991	7.691

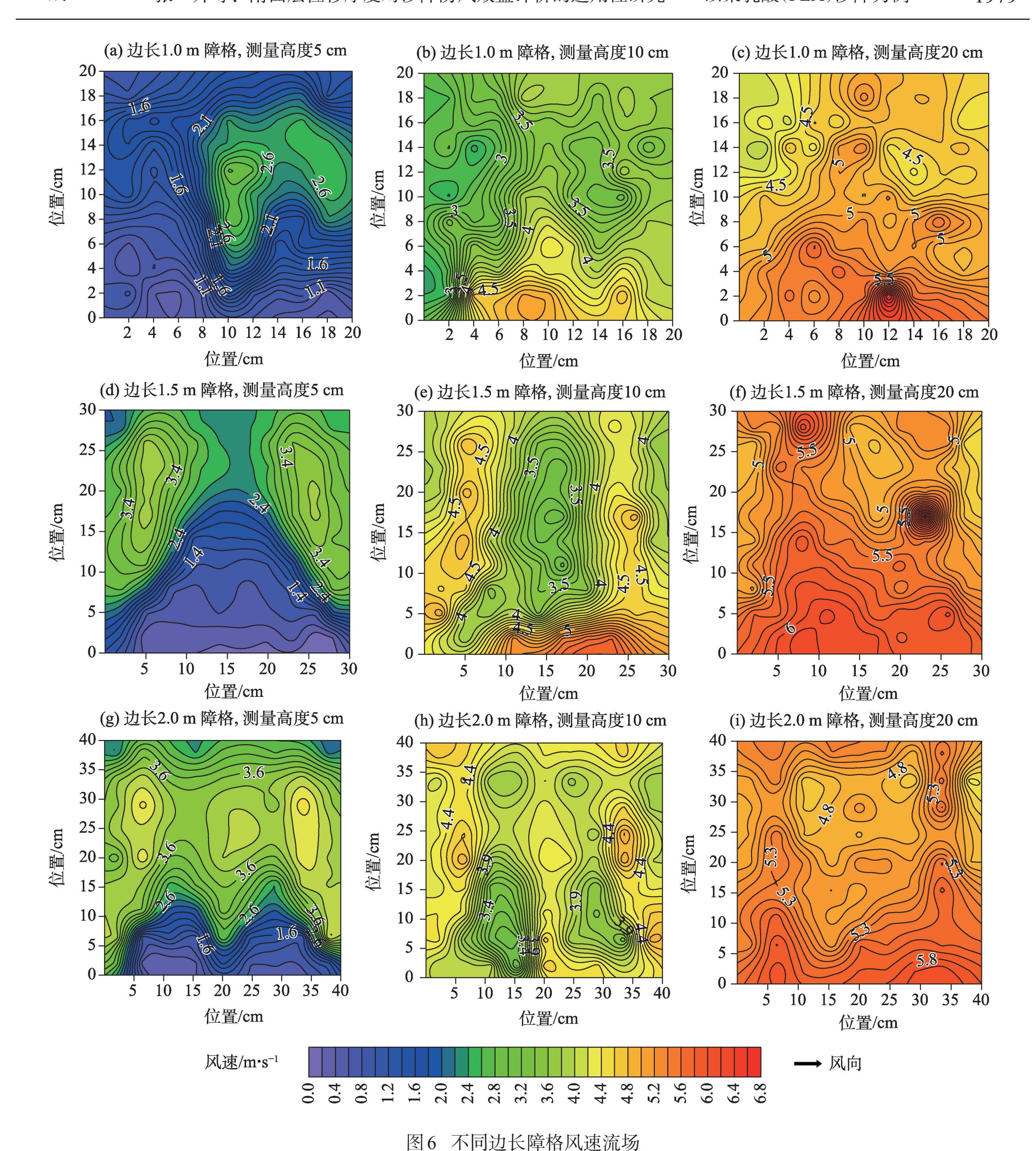


图6　不同边长障格风速流场

Fig. 6　Wind speed flow fields of different side length barrier grids

降，表明边长较大的网格防风蚀能力较差，网格内风速较高。

2.6　相关性分析

地表粗糙度和附面层位移厚度与各指标间的相关性分析(图8)可见，地表粗糙度与障格边长和风速呈负相关关系，与防风效能呈正相关关系，但相关性不显著。附面层位移厚度与障格边长和风速呈负相关关系，与防风效能呈正相关关系，且相关性极显著，相关系数均大于0.96。

3　讨 论

3.1　地表粗糙度的准确性

由表2、图6和图7可见，聚乳酸沙袋沙障的防护效果随着障格边长的增大而减弱。从表1可以看到，附面层位移厚度这一指标准确地反映出沙障防

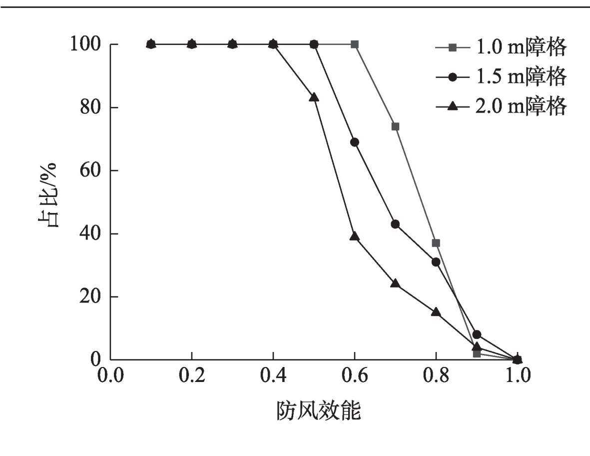


图7 不同边长沙障防风效能

Fig. 7 Wind prevention efficiency of sand barriers with different side lengths

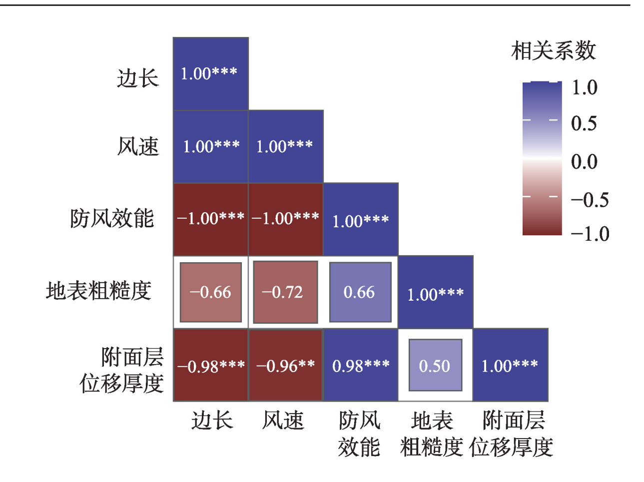


图8 各指标间相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between various indicators

护效果的规律性，地表粗糙度的结果并不完全准确，且图8相关性分析也表明地表粗糙度与各参数间的相关性低于附面层位移厚度。为了验证地表粗糙度的适用性，本研究选取多个高度的风速值与实际1 m高度处的风速组合计算地表粗糙度（表4）。从表4可见，实际计算高度在15~20 cm时，地表粗糙度并没有反应出真实情况，而其他高度计算出的结果则有较好的指示性。

本研究进一步拟合出沙障障格沿风向的纵截面流场图（图9）。由图9可见，气流在经过沙障时出现明显的抬升加速作用，沙障上方区域内抬升气流与原空气叠加作用明显，风速变化较为剧烈，而在

表4 不同高度组合计算所得的地表粗糙度

Tab. 4 Surface roughness calculated by combining different heights

障格边长/m	测量高度					地表粗糙度均值
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	
1.0	0.0198	0.0243	0.0231	0.0142	0.0114	0.0186a
1.5	0.0092	0.0094	0.0054	0.0092	0.0084	0.0083b
2.0	0.0022	0.0059	0.0110	0.0202	0.0057	0.0090b

注：不同小写字母表示在P=0.05水平上差异显著。

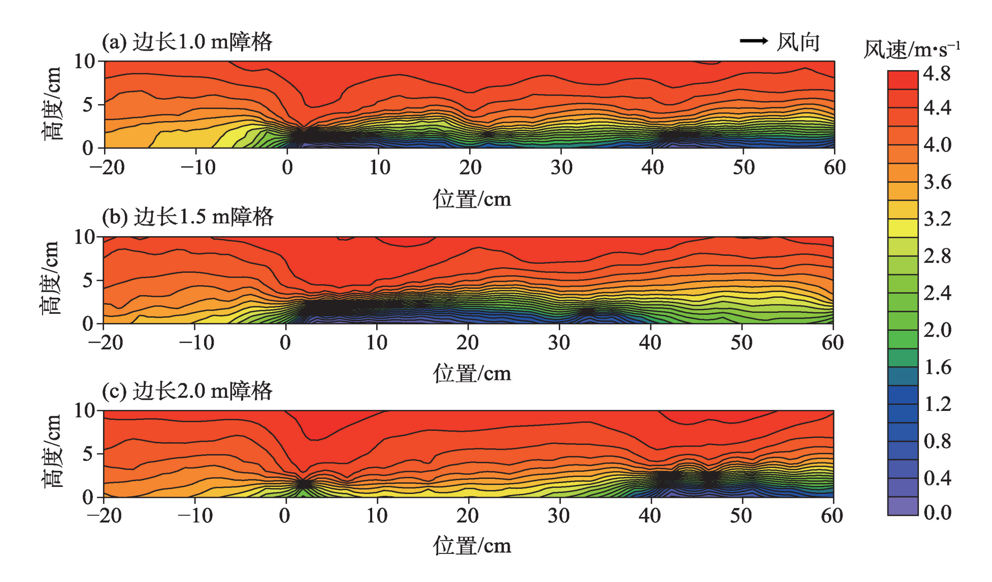


图9 沿风向纵截面流场

Fig. 9 Flow fields of longitudinal section along the wind direction

抬升区域之上,气流又趋于稳定。表4中地表粗糙度异常值的计算高度正好对应于模型中气流急剧变化的3~4 cm的高度,因此可以判定气流的剧烈变化是导致地表粗糙度结果不准确的主要原因。

3.2 附面层位移厚度的适用性

在实际中,地表附面层的高度要远超出防护措施的有效防护高度,附面层位移厚度也超过本研究的测量范围,因此在应用于风蚀防护评价时需要进行一定的改进。在式(4)中,理想状态下的风速值(a_0)无法测量,而在应用中选取超过防护措施有效防护高度的风速值即可。由图9可见,不同边长的沙障障格内实际高度超过0.5 m时,风速趋近于原风速,因此可以选取1.0 m作为评价沙障防护效果时附面层位移厚度的计算高度。此外,在进行防护林、生物结皮等其他防护措施的效果评价时也可以进行相应调整。

4 结 论

(1) 聚乳酸沙袋沙障具有较好的防风作用,且防护效果随着沙障规格的增大而减弱。

(2) 地表粗糙度是由2个不同高度的风速计算得到,当高度选取在风速急剧变化的区间范围内时,计算得到的地表粗糙度准确性较差,因此在应用时要注意气流结构特征。

(3) 附面层位移厚度是对有效防护高度内的风速廓线进行计算,弥补了区间气流急剧变化带来的影响,在评价防护措施的效果时准确性较高,可以作为地表粗糙度的辅助参考指标。

参考文献(References)

[1] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京:中国林业出版社, 2010: 26-27. [Ding Guodong. Aeolian physics[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010: 119.]

[2] Touré A A, Tidjani A D, Rajot J L, et al. Dynamics of wind erosion and impact of vegetation cover and land use in the Sahel: A case study on sandy dunes in southeastern Niger[J]. Catena, 2019, 177: 272-285.

[3] Zhou C L, Yang F, Mamtimin A, et al. Wind erosion events at different wind speed levels in the Tarim Basin[J]. Geomorphology, 2020, 369: 107386, doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107386.

[4] Xiao L G, Li G Q, Zhao R Q, et al. Effects of soil conservation measures on wind erosion control in China: A synthesis[J]. Science of the Total Environment, 2021, 778: 146308, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146308.

[5] Emilio R C, Yolanda C, Sonia C, et al. Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion [J]. Geomorphology, 2012, 145: 81-89.

[6] Liang J, Ning R X, Sun Z H, et al. Preparation and characterization of an eco-friendly dust suppression and sand-fixation liquid mulching film[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 256: 117429, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117429.

[7] 王逸敏, 刘康, 屈建军. 沙障对流沙地植被和土壤养分的影响[J]. 中国沙漠, 2019, 39(3): 56-65. [Wang Yimin, Liu Kang, Qu Jianjun. Effects of sand barriers on vegetation and soil nutrient in sand dunes[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 56-65.]

[8] 闫敏, 左合君, 贾光普, 等. 不同防沙措施的风沙流及其携沙粒度垂直分异特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1513-1522. [Yan Min, Zuo Hejun, Jia Guangpu, et al. Vertical distribution characteristics of wind-sand flow and its grain size under different sand control measures[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1513-1522.]

[9] 石麟, 李红悦, 赵雨兴, 等. 毛乌素沙地流动沙丘不同沙障组合措施的防风固沙效益评价[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 268-279. [Shi Lin, Li Hongyue, Zhao Yuxing, et al. Benefit evaluation of wind prevention and sand fixation under the combined measures of sand barrier in mobile dunes in Mu Us Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(2): 268-279.]

[10] Abulaiti A, Kimura R, Kodama Y. Effect of flexible and rigid roughness elements on aeolian sand transport[J]. Arid Land Research and Management, 2016, 31: 1-14.

[11] Zhang S, Ding G D, Yu M H, et al. Application of boundary layer displacement thickness in wind erosion protection evaluation: Case study of a *Salix psammophila* sand barrier[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16 (4): 592, doi: 10.3390/ijerph16040592.

[12] Wu X G, Fan J Q, Sun L, et al. Wind erosion and its ecological effects on soil in the northern piedmont of the Yinshan Mountains [J]. Ecological Indicators, 2021, 128: 107825, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107825.

[13] Chamberlain A C. Roughness length of sea, sand and snow[J]. Boundary Layer Meteorology, 1983, 25: 405-409.

[14] 杨坪坪, 李瑞, 盘礼东, 等. 地表粗糙度及植被盖度对坡面流曼宁阻力系数的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 106-114. [Yang Pingping, Li Rui, Pan Lidong, et al. Effects of surface roughness and vegetation coverage on Manning's resistance coefficient to overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(6): 106-114.]

[15] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London: Methuen and Co., 1941.

[16] Jarrah M, Mayel S, Tatarko J, et al. A review of wind erosion models: Data requirements, processes, and validity[J]. Catena, 2020, 187: 104388, doi: 10.1016/j.catena.2019.104388.

[17] 李鑫玉, 王静璞, 王周龙. 空气动力学粗糙度研究进展[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 407-417. [Li Xinyu, Wang Jingpu, Wang

Zhoulong. Research progress on aerodynamic roughness[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 407−417.]

[18] 王晓,张伟民. 粗糙元的空气动力学效应研究进展[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 922−927. [Wang Xiao, Zhang Weimin. Review on aerodynamic effects of roughness element[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 922−927.]

[19] Dong Z B, Liu X P, Wang X M. Aerodynamic roughness of gravel surfaces[J]. Geomorphology, 2002, 43(1): 17−31.

[20] Meng W, Tang G Q, Liu Y S, et al. The difference in the boundary layer height between urban and suburban areas in Beijing and its implications for air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2021, 260: 118552, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118552.

[21] Bruno L, Fransos D, Giudice A L. Solid barriers for windblown sand mitigation: Aerodynamic behavior and conceptual design guidelines[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 173: 79−90.

[22] Abulaiti A, Kimura R, Kodama Y. Effect of flexible and rigid roughness elements on aeolian sand transport[J]. Arid Land Research, 2016, 31: 111−124.

[23] 原伟杰, 虞毅, 岳永德, 等. 沙丘部位对聚乳酸纤维沙袋沙障降解速度的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 166−171. [Yuan Weijie, Yu Yi, Yue Yongde, et al. Effects of slope position on the degradation of PLA sand barriers[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(4): 166−171.]

[24] 王艺钊, 原伟杰, 丁国栋, 等. 聚乳酸(PLA)沙障凹曲面及沉积物粒度特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 671−678. [Wang Yizhao, Yuan Weijie, Ding Guodong, et al. Concave surface features and grain-size characteristics in polylactic acid sand barrier[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 671−678.]

[25] Kurita E, Seo T. Multivariate normality test based on kurtosis with two-step monotone missing data[J]. Journal of Multivariate Analysis, 2021, 188: 104824, doi: 10.1016/j.jmva.2021.104824.

[26] 孙伟, 徐芬. 基于偏度方法的地物杂波识别及去除[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 522−528. [Sun Wei, Xu Fen. Preliminary study on detection and removal of clutter based on skewness method[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(3): 522−528.]

[27] Ye L, Gu X Z, Wang D B, et al. An unbiased estimator of coefficient of variation of streamflow[J]. Journal of Hydrology, 2021, 594: 125954, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.125954.

[28] 张帅, 丁国栋, 高广磊, 等. 硬质地HDPE沙障防风效益的风洞试验[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 127−133. [Zhang Shuai, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Wind tunnel test on windproof benefit of horniness HDPE sand barrier[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 127−133.]

[29] Liu J Q, Kimura R, Miyawaki M, et al. Effects of plants with different shapes and coverage on the blown-sand flux and roughness length examined by wind tunnel experiments[J]. Catena, 2021, 197: 104976, doi: 10.1016/j.catena.2020.104976.

Applicability study of the boundary layer displacement thickness to the evaluation of sand barrier windbreak benefits: A case of polylactic acid sand barrier

ZHANG Shuai[1], YUAN Weijie[1], LIU Hui[2], WANG Haixia[1],
GUAN Haohui[1], WANG Luzhen[3]

(1. Experimental Center of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry/National Permanent Scientific Research Base for Warm Temperate Zone Forestry of Jiulong Mountain in Beijing, Beijing 102300, China; 2. Water & Land Eco-Environment Technology Institute of Beijing Co. Ltd, Beijing 100080, China; 3. Qinghai Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower Co., Ltd, Xining 810000, Qinghai, China)

Abstract: Surface roughness, a conventional index widely applied in wind erosion protection, plays a crucial role in evaluating the effectiveness of engineering measures such as forest and sand barriers. Despite its prevalent use, practical applications reveal its limited accuracy. Consequently, we introduce a novel index termed "boundary layer displacement thickness". Through wind tunnel simulations, we assessed the wind speed frequency distribution of various sandbag barriers. We computed the mean wind speed, wind prevention efficiency, and also scrutinized the wind speed flow field to validate the precision of both roughness and boundary layer displacement thickness measurements. The findings indicate that an increase in the length of the polylactic acid sandbag barrier corresponds to an upward trend in average wind speed. Specifically, the average wind speed within the 1.5-m and 2.0-m barriers is 1.13 and 1.24 times that of the 1.0-m barrier, respectively. Concurrently, wind prevention efficiency experiences a decline, with values exceeding 0.6 for the 1.0-m barrier, 0.5 for the 1.5-m barrier, and 0.4 for the 2.0-m barrier. Analysis of the wind velocity field data reveal that the high-speed zone expands as the barrier grid size increases, signifying a weakened protective effect with large sand barriers. Notably, the boundary layer displacement thickness demonstrates a consistent decreasing trend with increasing barrier size, aligning with the aforementioned pattern. However, surface roughness exhibits an anomalous pattern, initially decreasing and then increasing. In summary, the boundary layer displacement thickness proved to be more accurate and emerged as a promising supplementary reference indicator for evaluating the efficacy of wind erosion protection measures.

Key words: boundary layer displacement thickness; wind erosion evaluation; wind tunnel simulation; polylactic acid sand barrier